

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
OPE - ORGANIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y DE EMPRESA (ASPECTOS  
TÉCNICOS, JURÍDICOS Y ECONÓMICOS EN PRODUCCIÓN)

## **SIRUS: Un sistema de ayuda al diseño y dirección de operaciones de recogida de residuos sólidos urbanos**

Joaquín Bautista-Valhondo

OPE-WP.2014/12  
(Documento científico-técnico 20141125 / 20010202)



**PROTHIUS**  
Càtedra Organització Industrial

<http://futur.upc.edu/10954555>

<http://www.prothius.com>

## Presentación

SIRUS, abreviatura de “Sistema Integrado de Recogida Urbana Selectiva”, es un software que surge y se desarrolla bajo la actividad de transferencia de tecnología denominada *Projecte integral de gestió de residus urbans al municipi de Sant Boi de Llobregat*: convenio de colaboración (C3445) establecido entre el Ajuntament y la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). La función del sistema es ayudar a la toma de decisiones de diseño y de dirección de operaciones relativas a la recogida de residuos urbanos en un municipio.

La mejora en la calidad del servicio al ciudadano, eje central del proyecto, ha prevalecido como objetivo general prioritario en todas las decisiones; no obstante, ha sido necesario considerar el marco de actuación en el que se ha desarrollado el proyecto, por lo que se planteó como objetivo general secundario diseñar sistemas de recogida que propiciaran la total adaptación a las pautas marcadas por la Junta de Residus (JR), organismo que a través del Programa Metropolità de Gestió de Residus Municipals (PMGRM) rige y delimita el marco legal de actuación en lo referente a la recogida de residuos urbanos y persigue unos objetivos y fija unas directrices de trabajo y desarrollo paralelas a las del Plan Nacional de Residuos Urbanos (PNRU). Estos dos objetivos generales han exigido la renovación del sistema físico y de gestión actuales.

La propuesta inicial del Estudio comprendía un análisis de la situación del sistema físico de recogida del momento y la elaboración de una serie de propuestas de nuevos sistemas de recogida tales que, por una parte sirvieran para ofrecer un mejor servicio al ciudadano y, por otra, permitieran la adaptación progresiva a las pautas marcadas por el PNRU en lo que se refiere a recogida selectiva.

La experiencia ha servido para que el equipo de trabajo haya podido hacer aportaciones, y de hecho siga trabajando en ello, en el campo de la recogida de residuos urbanos.

En primer lugar el equipo ha desarrollado un conjunto de métodos de trabajo para diseñar sistemas físicos de recogida en varias fases: la primera se refiere a la localización de instalaciones receptoras de residuo fraccionado (las denominadas áreas de aportación) en un grafo representativo de la vía pública de un municipio; la segunda se preocupa por la determinación de la capacidad volumétrica de cara área de aportación por fracciones de residuo; la tercera se refiere al diseño de itinerarios en función de la fracción de residuos y de la cadencia de recogida.

En segundo lugar, el proyecto ha dado un resultado importante en el terreno de la transferencia de tecnología, cual es el diseño, la confección e implantación de las aplicaciones incorporadas en el software SIRUS que, además de ser imprescindibles para el diseño ágil de

sistemas físicos de recogida selectiva, facilitan la gestión de forma dinámica. Estas aplicaciones, integradas con total compatibilidad en los servicios informáticos actuales del Ajuntament de Sant Boi, servirán para facilitar las labores periódicas de localización de áreas de aportación y contenedores, así como el diseño de rutas ante cambios de las condiciones del municipio. En la actualidad, SIRUS está siendo aplicado a dos municipios de dos comunidades autonómicas.

En tercer lugar, el proyecto ha servido para desarrollar una serie de técnicas de resolución de problemas mixtos de localización y rutificación materializadas en aplicaciones informáticas. Sobre este punto, se abre una vía de trabajo para estudiar, modelizar, desarrollar herramientas e implantarlas y experimentar en el campo de la optimización combinatoria.

Finalmente, el proyecto ha abierto la mente del equipo para detectar problemas de características similares en otros servicios municipales y privados.

Para el desarrollo e implantación del proyecto se constituyó un equipo pluridisciplinario de trabajo compuesto por Félix Martínez, Eduard Nebot, Josep Plaza, Carles Serrano y Antoni Traveria, por parte del municipio del Sant Boi (Ajuntament y empresa municipal CORESSA), y Joaquín Bautista, como director del proyecto, por parte de la UPC.

El equipo agradece a los becarios con cargo al proyecto, don David Palanques Bonavía y don Albert Ortíz de Pablo, su implicación y aportaciones al mismo.

Agradecemos también el soporte y confianza dados por el Ajuntament de Sant Boi de Llobregat y la Universitat Politècnica de Catalunya y de un modo especial al Concejal don Carles Capdevila y a los profesores Francisco Javier Llovera Sáez, director del DOE, y Ramon Companys Pascual, director de la ETSEIB.

Las líneas que inmediatamente siguen, recogen diversos aspectos del proyecto. Los detalles del proyecto se pueden consultar en la bibliografía recopilada en el anexo I de este resumen.

*Joaquín Bautista-Valhondo*  
*Barcelona, febrero de 2001*

## 0 Introducción

La unificación de los programas de recogida de residuos urbanos desarrollados en las comunidades autónomas ya es una realidad y recibe el nombre de Plan Nacional de Residuos Urbanos<sup>1</sup> (PNRU). El tratamiento de residuos urbanos se encuentra en una fase de cambio e innovación necesarios para respetar el medio ambiente. La ejecución de una recogida selectiva de la basura en los municipios ha dejado de ser un privilegio, pues el PNRU obliga a las poblaciones con más de 1000 habitantes a disponer de la infraestructura indispensable para desarrollar una separación correcta.

El PNRU abarca un horizonte temporal de siete años comprendidos entre el 2000 y el 2006 (ambos inclusive). Dentro del período contemplado, los objetivos y las metas se fijan en etapas bianuales, creando una dinámica de evolución continua con evaluaciones constantes. La inmediatez del corto plazo (2001) es el primer paso para afianzar el camino a seguir en los posteriores objetivos a medio (2003) y largo plazo (2006) dentro del horizontes del Plan.

Sant Boi de Llobregat es uno de los municipios catalanes afectados por la normativa referente a la obligatoriedad en la separación de los residuos. Además de Sant Boi, el Área Metropolitana de Barcelona engloba a un número significativo de municipios en estas condiciones.

Las poblaciones catalanas del Área Metropolitana de Barcelona parten con una relativa ventaja respecto a otros municipios, como consecuencia del despliegue del Programa Metropolità de Gestió de Residus Municipals (PMGRM) con unos objetivos y directrices de trabajo y desarrollo paralelas a las del PNRU.

En el marco de los principios rectores del PNRU son objetivos básicos los siguientes:

- Fomento de la reducción de la cantidad y peligrosidad de los residuos urbanos.
- Aumento de la reutilización, reciclaje y valorización de los residuos urbanos y, en especial, de los residuos de envases, cumpliendo los objetivos y plazos marcados en la Ley de Envases y Residuos de Envases<sup>2</sup>.
- Adaptación, antes del 31 de diciembre del año 2005, en los casos en los que sea posible, de las infraestructuras existentes a la legislación presente y la previsible a

---

<sup>1</sup> Disponible en [http://noticias.juridicas.com/base\\_datos/Admin/r130100-mma.html](http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/r130100-mma.html). Boletín Oficial del Estado, 2000. Resolución de 13 de enero de 2000, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de Ministros, de 7 de enero de 2000, por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos Urbanos. BOE n 28, 2-Feb-2000

<sup>2</sup> Disponible en [http://noticias.juridicas.com/base\\_datos/Admin/l11-1997.html](http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/l11-1997.html).

corto plazo en esta materia. Cierre de las instalaciones en las que esa adaptación no sea posible.

- Valorización de la materia orgánica contenida en los residuos urbanos, mediante la producción de *compost* y/o el aprovechamiento de la energía contenida en ella.
- Creación de una red de infraestructuras para la gestión de estos residuos que permita alcanzar los objetivos contemplados en este Plan.
- Limitación del vertido final o eliminación en vertedero a la fracción de residuos urbanos no valorizable.
- Recuperación y restauración los espacios degradados por vertidos incontrolados.
- Establecimiento de un modelo de financiación, basado en la cooperación y responsabilidad compartida de las diferentes personas, empresas, entidades y organismos implicados en la gestión, estableciendo los instrumentos económicos adecuados para el fomento de la prevención, la aplicación de tecnologías menos contaminantes o las mejores técnicas disponibles (MTD), la reutilización, el reciclado y otras formas de valorización de residuos urbanos, así como para promover las tecnologías menos contaminantes en la eliminación de los mismos y desincentivar su generación.
- Implantación de la recogida selectiva en todos los núcleos de población de más de 1000 habitantes antes del 31 de diciembre del año 2006.
- Creación de un inventario, base de datos y sistema de información referido a los residuos urbanos, tanto en las Comunidades Autónomas como a nivel nacional, para su integración en el futuro Inventario Nacional de Residuos.
- Fomento de campañas de información y sensibilización dirigidas a todos los agentes implicados en el sistema de gestión de los residuos urbanos, garantizando particularmente el libre acceso de los ciudadanos a la información en estas materias. Fomento de los programas de formación de especialistas en la gestión de residuos urbanos.
- Aplicación de la Ley 10/1998, de Residuos<sup>3</sup>, al caso concreto de los residuos urbanos.

La recogida urbana selectiva se convierte en uno de los procesos más importantes en el ciclo generación-transformación de residuos. Su buena gestión se debe apoyar en herramientas que permitan diseñar y evaluar ágilmente sistemas físicos de recogida y en disponer de datos fiables, tanto para el residuo generado en hogares como en actividades comerciales, huyendo de algunos estándares y valores medios<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> Disponible en [http://noticias.juridicas.com/base\\_datos/Admin/l10-1998.html](http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/l10-1998.html).

<sup>4</sup> La generación de residuos de un ciudadano medio en nuestro país se cifraba en 1996 en 1,2 kg/día; este valor no es válido para conocer la basura que genera un ciudadano en su hogar, ya que agrega otros factores. Concretamente, entre un 20 % y un 50 %

Bajo esta perspectiva, resulta aconsejable conocer qué se genera realmente en un hogar y en un comercio por separado. De esta manera, el servicio ofrecido será de mayor calidad, y en el caso de adoptar la técnica de recogida puerta a puerta en los comercios, la dimensión del conjunto de contenedores distribuidos en las calles será más ajustada. Por otra parte, desde el punto de vista industrial, el conocimiento ajustado de la materia prima que se está tratando, permite un mejor aprovechamiento de recursos conducente a la reducción de costes de explotación de servicios y de factorías.

Es fácil advertir que el conjunto de cambios e innovaciones que se desprende con la aplicación del PNRU con el objeto de respetar el medio ambiente, genera nuevos e interesantes problemas de gestión en los municipios: qué sistema de recogida se debe adoptar, dónde localizar las áreas de aportación o puntos de recogida, cuántos contenedores y de qué tipo de fracción se debe asignar a cada área, qué rutas son las más adecuadas y cuál debe ser la frecuencia de recogida para cada fracción, y qué dimensión debe tener la flota de vehículos. SIRUS ha sido diseñado con el propósito de ayudar a tomar decisiones para dar solución a estos problemas: su misión es optimizar y simular la gestión de recogida de residuos urbanos en función de un conjunto de condiciones y criterios orientados a satisfacer distintos niveles de servicio.

---

de los residuos asignados a cada habitante se generan en los comercios, y por lo tanto, para las zonas con una alta concentración comercial se debería corregir dicho valor medio.

## 1 El Proyecto. Objetivos y resultados técnicos

### 1.1 Objetivos

Los objetivos globales del *Projecte integral de gestió de residus urbans al municipi de Sant Boi de Llobregat* (C3445) se han clasificado en tres categorías. Para cada categoría, se han definido subobjetivos concretos:

#### 1.- Mejorar la calidad de servicio al ciudadano.

- 1.1.- Localizar en el municipio los puntos de recogida, también llamados baterías, de forma que los desplazamientos de los usuarios no superen una longitud establecida y considerada como la más apropiada (por ejemplo: 60 metros).
- 1.2.- Reducir el impacto visual generado por la presencia superflua de baterías de contenedores, minimizando el número de puntos de recogida y de contenedores dispuestos en ellos.
- 1.3.- Reducir el impacto acústico suprimiendo las trayectorias innecesarias por zonas con alta densidad de población.
- 1.4.- Reducir el impacto ambiental minimizando el tiempo de presencia de los vehículos de recogida durante el servicio.
- 1.5.- Reducir el impacto visual debido a la presencia masiva de residuos en puntos concretos generados por instalaciones comerciales.

#### 2.- Definir un sistema de recogida físico en el Ajuntament de Sant Boi que propicie el ajuste progresivo a las pautas marcadas por el Programa Metropolità de Gestió de Residus Municipals (PMGRM).

- 2.1.- Diseñar un sistema de recogida selectiva.
- 2.2.- Alcanzar con el servicio de recogida diseñado, los valores orientativos bianuales establecidos en el PMGRM para las distintas fracciones de residuo.

#### 3.- Dotar al Ajuntament de Sant Boi de aplicaciones informáticas de ayuda a la gestión de operaciones en el sistema de recogida.

- 3.1.- Diseñar, programar e implantar una aplicación informática que permita la localización automática de los puntos de recogida en la población y la

asignación de contenedores para las distintas fracciones con el objetivo de minimizar el número de baterías y contenedores de forma que la distancia entre ellos y el usuario no supere un valor establecido. Adicionalmente, la aplicación debe permitir valorar una solución definida por el usuario.

- 3.2.- Diseñar, programar e implantar una aplicación informática que permita establecer rutas de recogida con mínimo impacto ambiental. Adicionalmente, la aplicación debe permitir valorar una solución definida por el usuario.

SIRUS<sup>5</sup> es el soft resultante del tercer objetivo, su concepción ha estado condicionada por el primer objetivo; su aplicación, como optimizador, permite diseñar sistemas de recogida urbana selectiva (segundo objetivo) y, como simulador, permite valorar un sistema físico de recogida descrito en una base de datos.

Brevemente, las aplicaciones incorporadas en SIRUS permiten:

- Distribuir, sobre una red viaria, áreas de aportación:
  - Imponiendo una distancia máxima [1] recorrida por los ciudadanos<sup>6</sup>
  - Imponiendo un número fijo [2,3] de áreas<sup>7</sup>
- Estimar y repartir contenedores en las áreas
- Diseñar itinerarios de recogida de contenedores
- Evaluar una solución propuesta por el usuario

Actualmente el Ajuntament ya dispone, en sus instalaciones, de las aplicaciones indicadas en los sub-objetivos 3.1 y 3.2 que han servido para evaluar el actual sistema físico de recogida y diseñar uno nuevo acorde con los objetivos 1 y 2. Los resultados que aquí se presentan se centrarán en la descripción de estas herramientas por parecernos más trascendente el software desarrollado que su aplicación a un municipio concreto.

---

<sup>5</sup> Bautista J 2001. Proyecto integral de gestión de residuos urbanos en el municipio de Sant Boi de Llobregat. CPDA. Barcelona.

<sup>6</sup> Como en el caso del problema r-cubrimiento continuo. Ver, por ejemplo, referencia [01].

<sup>7</sup> Como en el problema p-centros continuo. Ver, por ejemplo, referencias [02] y [03].



## 1.2 El sistema SIRUS

SIRUS ha sido concebido para ayudar a tomar decisiones de diseño y de dirección de operaciones en sistemas físicos de recogida selectiva de residuos en municipios. El sistema ofrece soluciones automáticas, manuales y semiautomáticas, todas ellas evaluables en función de un conjunto de índices de calidad. Para construir una solución, deben ejecutarse un conjunto de acciones que agrupamos en dos fases:

- Localización de áreas de aportación
- Diseño de itinerarios de recogida.

### 1.2.1 Localización de áreas de aportación

Se distinguen las siguientes acciones:

- Selección de una zona geográfica y Localización automática de áreas de aportación
- Captura y evaluación de una distribución de áreas de aportación consolidada
- Distribución automática de contenedores en áreas de aportación
- Captura y evaluación de una distribución de contenedores consolidada

### Selección de una zona geográfica y localización automática de áreas de aportación

En primer lugar se procede a la apertura de la capa de tramos de la base de datos (Figura 1).

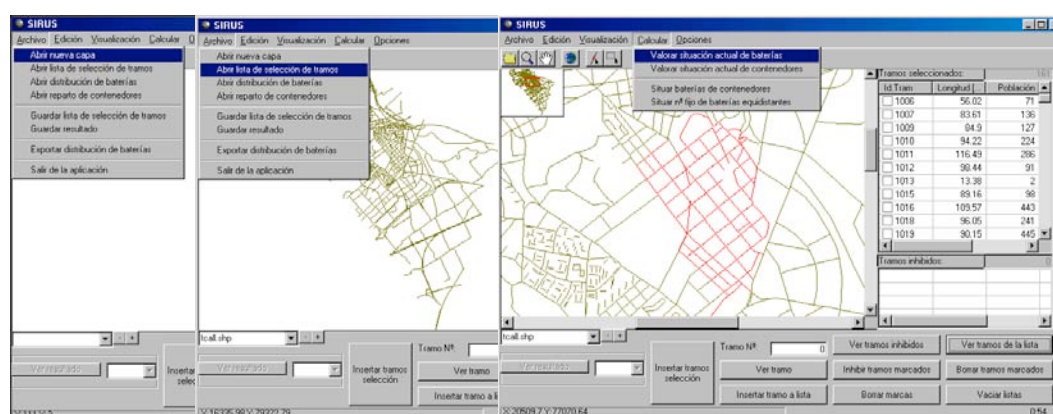


Figura 1. Acciones para la selección de una zona geográfica objeto de estudio.

Sobre la capa de tramos se selecciona un conjunto de tramos objeto de estudio. El conjunto de tramos puede corresponder a un sector o distrito del municipio o, sencillamente, puede tratarse de una zona natural sobre la que se mantendrán los mismos criterios de localización de áreas de aportación.

La posibilidad de dividir el municipio en zonas ofrece varias ventajas, entre ellas:

- (1) Analizar sobre una zona distintas técnicas de recogida<sup>8</sup>
- (2) Imponer un número fijo de áreas de aportación sobre una zona<sup>9</sup>
- (3) Proponer distintos valores de la distancia mínima entre áreas de aportación según la zona.

Tras seleccionar la zona sobre el plano del municipio y ajustar su tamaño mediante zoom, se puede proceder a la localización automática de áreas de aportación o puntos de recogida, con la posibilidad de emplear dos criterios:

- Fijar una distancia máxima de recorrido ciudadano.
- Fijar un número de áreas de aportación.

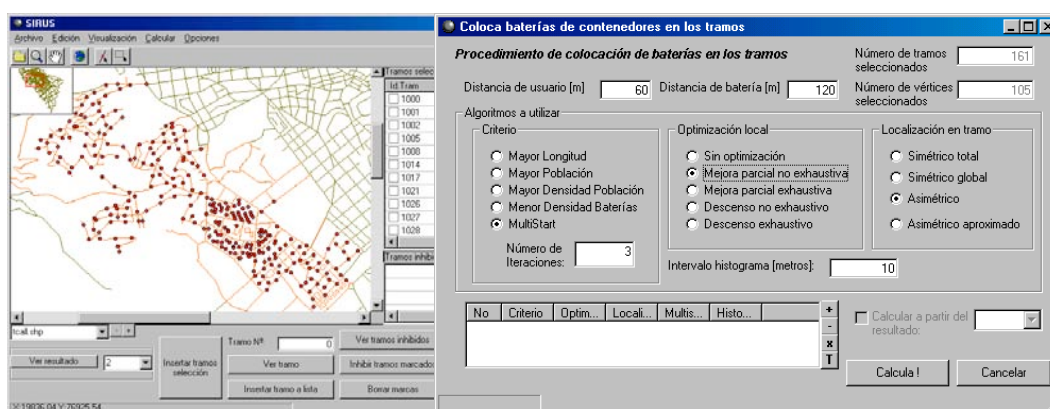


Figura 2. Solución automática y parámetros para localizar áreas de aportación según el criterio de máxima distancia de recorrido ciudadano

En ocasiones, puede convenir que un conjunto de tramos o calles estén libres de áreas de aportación (v.g. áreas de recogida neumática); éste es el caso de calles de intensa actividad comercial, zonas de interés artístico o simplemente calles inaccesibles al servicio. En tales

<sup>8</sup> En un mismo municipio, en alguna zona se puede optar por la técnica clásica camión-contenedor, ya sea con carga lateral o trasera, en otras por la recogida neumática y en otras por la subterránea, ello obliga a emplear distintos criterios de localización de áreas de aportación según la zona.

<sup>9</sup> Cuando se trata de una fracción selectiva (papel-cartón, vidrio, etc.), para la que no se exige la recogida de todo el residuo generado por los ciudadanos, es conveniente fijar el número de áreas de aportación en función del volumen de residuo que se desea recoger.

condiciones, se marcan los tramos correspondientes con el propósito de **inhibirlos**: el ciudadano puede circular a pie sobre una zona inhibida, pero no el servicio.

Si se adopta el criterio de máxima distancia de recorrido ciudadano, se debe definir un valor para dicho parámetro y fijar el intervalo del histograma de distribución de distancias; tras ello, se selecciona un procedimiento de resolución (Figura 2) entre los 100 algoritmos incorporados<sup>10</sup>.

En caso de imponer un número fijo de baterías (Figura 3), los parámetros solicitados son:

- (1) Número de baterías a localizar.
- (2) Calibre de la malla<sup>11</sup>.
- (3) Índice de repulsión entre baterías<sup>12</sup>.
- (4) Intervalo de histograma.
- (5) Distancia mínima permitida entre baterías.

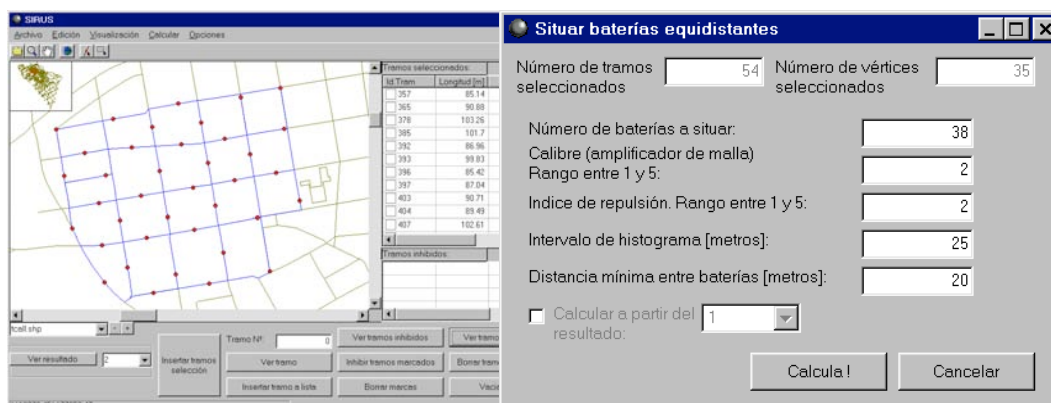


Figura 3. Solución y parámetros para localizar un número fijo de baterías de contenedores

Tanto en este caso como en el anterior, los cálculos se pueden realizar a partir de un resultado previo, respetando las posiciones y coberturas de las baterías ya localizadas y permitiendo el solape entre soluciones. Todas las soluciones obtenidas en una o varias sesiones se pueden almacenar y recuperar posteriormente.

<sup>10</sup> La selección de un algoritmo se realiza fijando una opción en cada uno de los tres módulos de clasificación: (1) criterio de prioridad en la cobertura de los tramos seleccionados, (2) tipo de optimización local y (3) formas de localización de baterías en los tramos.

<sup>11</sup> Se genera automáticamente una malla de emplazamientos posibles (únicos puntos del espacio sobre los que se puede localizar un área de aportación). El calibre define el tamaño de la malla de emplazamientos.

<sup>12</sup> Para este procedimiento, se ha establecido una analogía física, donde las baterías se asimilan a partículas bajo la influencia de un campo de fuerzas central repulsivo. El objetivo es minimizar la energía interna del sistema.

## Captura y evaluación de una distribución de áreas de aportación consolidada

Las soluciones obtenidas automáticamente son susceptibles de modificación: se permite la eliminación, la adición o el desplazamiento de puntos de recogida. Obviamente, aunque resulta poco operativo, se puede construir una solución de forma manual añadiendo, de una en una, áreas de aportación sobre una zona seleccionada. Las soluciones almacenadas y consolidadas de cada fracción (rechazo, papel-cartón, vidrio, envases, orgánica y otros) se pueden capturar, visualizar y modificar posteriormente (ver Figura 4). Como es lógico, para llevar a cabo la captura de una distribución de áreas consolidada se debe seleccionar el tipo de residuo.

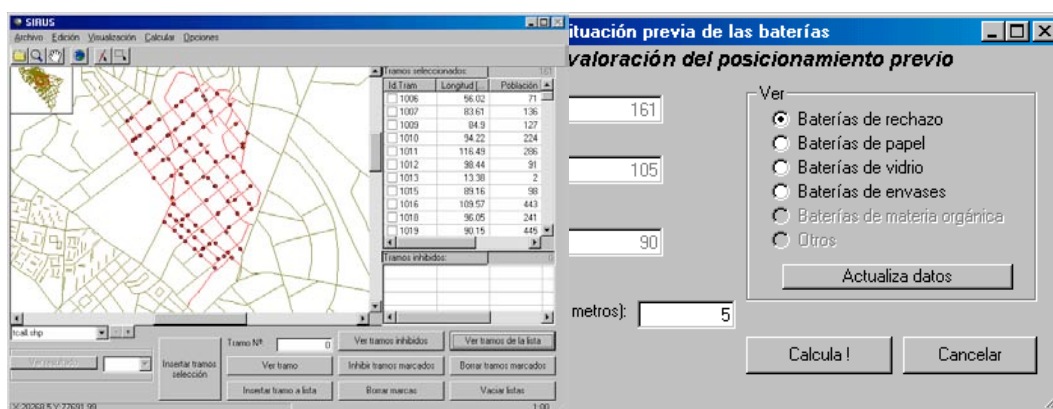


Figura 4. Captura de una distribución de áreas de aportación tras seleccionar una fracción de residuo

Los resultados globales más significativos de una solución se muestran en la Figura 5.

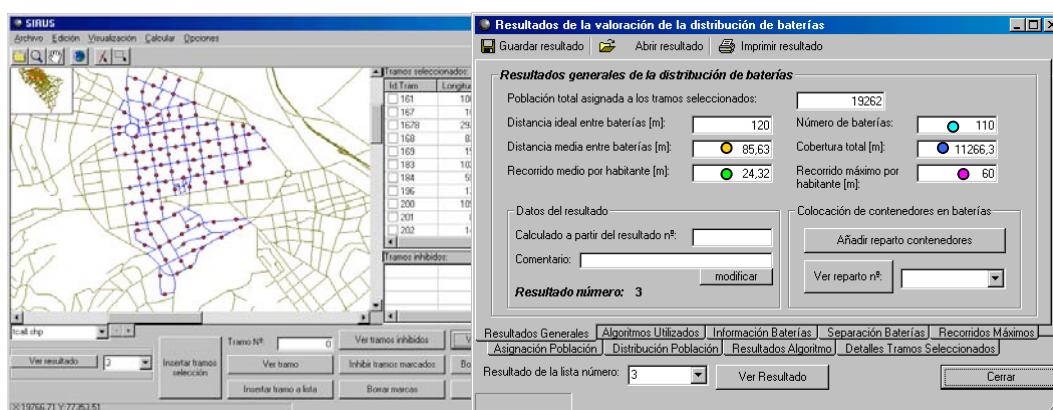


Figura 5. Resultados generales de la distribución de áreas de aportación

Estos resultados son:

- (1) Distancias máxima y media recorrida por los ciudadanos hasta el área de aportación más cercana según su posición<sup>13</sup> en la red.
- (2) Cobertura total, medida en metros, asociada a la distribución de baterías.
- (3) Población total asignada a los tramos seleccionados.

A partir de este punto, se puede proceder al cálculo y reparto de contenedores o a la consulta de resultados en detalle<sup>14</sup>.

SIRUS ofrece una información valiosa para medir la calidad de servicio ofrecida (Figura 6). Dada una disposición de puntos de recogida, se determina, para cada tramo, la distancia que separa al ciudadano más perjudicado de la(s) batería(s) más próxima(s), se identifica(n) esta(s) batería(s) y se indica la posición exacta de dicho ciudadano respecto a la distancia del vértice de partida (Fnode) del tramo; también se mide el recorrido medio de los habitantes en cada tramo. Asimismo, se ofrece la curva de distribución de la población en función de la distancia recorrida por los ciudadanos al área de aportación más cercana; esta herramienta sirve para detectar deficiencias en el nivel de servicio asociado al desplazamiento ciudadano: el exceso de carga de población en los últimos intervalos del diagrama es síntoma de una baja calidad del servicio.

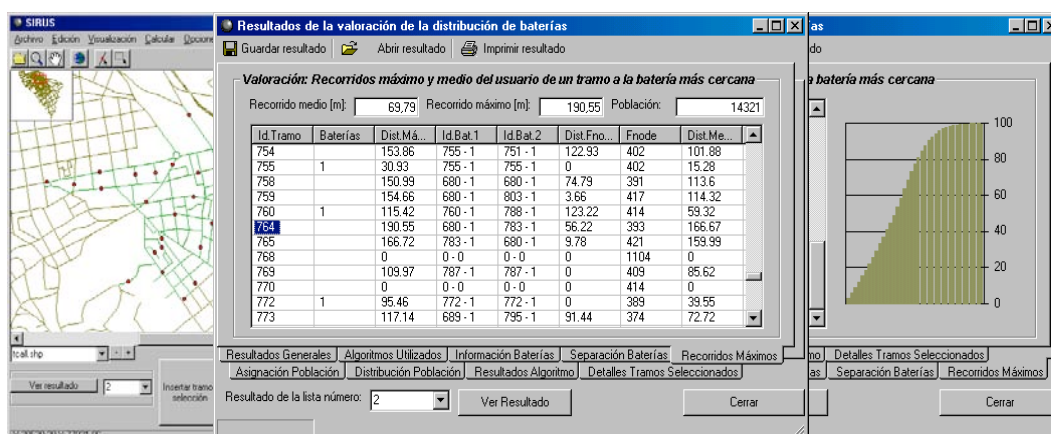


Figura 6. Valoración, por tramos, del recorrido máximo y medio de los habitantes. Distribución de la población en función de la distancia recorrida por los ciudadanos al área de aportación más cercana

<sup>13</sup> La población asignada a un tramo se ha supuesto homogéneamente distribuida a lo largo del tramo: densidad de población lineal constante en un tramo, con esta hipótesis, cada habitante se asigna a la batería más próxima teniendo en cuenta su desplazamiento a través de la red.

<sup>14</sup> Se ofrece la posibilidad de consultar información detallada sobre tramos, baterías y habitantes.

Otro bloque de información interesante está constituido por la asignación de la población a las áreas de aportación<sup>15</sup>; el cálculo se realiza a partir de la población censada en los tramos bajo los supuestos de distribución homogénea de habitantes en los tramos y que todo ciudadano se dirige al punto de recogida más próximo a él, con ello se determina el número de usuarios de cada área de aportación; también se calcula, para cada área, su cobertura en metros y su vecina más próxima con la distancia que las separa<sup>16</sup>. Para cada cruce de la red, se determina además el área de aportación más cercana a él y la distancia que los separa (Figura 7).

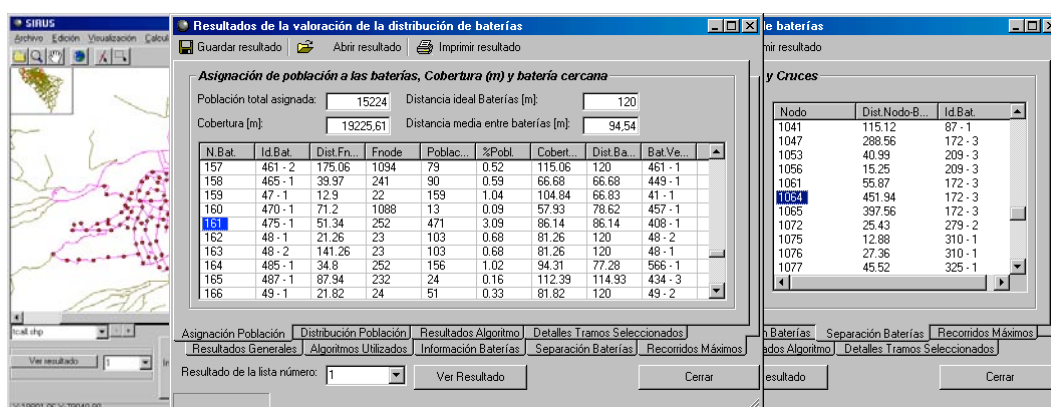


Figura 7. Asignación de la población a áreas de aportación, cobertura de cada área y separación entre cruces y puntos de recogida más próximos.

## Distribución automática de contenedores en áreas de aportación

Tras decidir qué solución relativa a la distribución de áreas de aportación es la más apropiada, el proceso de diseño del sistema físico de recogida continúa con el cálculo de necesidades de contenedores o el reparto de un número fijo de éstos. Los datos solicitados para el cálculo de necesidades de contenedores son:

- (1) Volumen de un contenedor.
- (2) Plazo de recogida.
- (3) Densidad del residuo objeto de estudio.
- (4) Masa media de residuo generada por un ciudadano al día.
- (5) Factor máximo de llenado aconsejable para un contenedor.

<sup>15</sup> Una batería se identifica con el código del tramo a que está asignada y el número de orden, desde el Fnode, en dicho tramo. La posición de una batería se indica con la distancia que la separa del Fnode del tramo a que pertenece.

<sup>16</sup> Obviamente SIRUS detecta las baterías que presentan máxima o mínima población, cobertura y máximo o mínimo aislamiento respecto a sus vecinas más próximas.



Con estos datos se estima el número de contenedores mínimo, en cada área de aportación, para satisfacer el servicio (Figura 8). En caso de optar por el reparto de un número fijo de contenedores<sup>17</sup>, se solicita adicionalmente:

- (6) Número de contenedores a distribuir.
- (7) Porcentaje de la población participativa<sup>18</sup>.
- (8) Un procedimiento de reparto<sup>19</sup>.

The image shows two windows from the SIRUS software. The left window, titled 'Resultados de la valoración de la distribución de baterías', contains a section 'Resultados generales de la distribución de baterías' with fields for 'Población total asignada a los tramos seleccionados' (18120), 'Distancia ideal entre baterías [m]' (120), 'Distancia media entre baterías [m]' (80.2), 'Reconido medio por habitante [m]' (24.5), 'Número de baterías' (101), 'Cobertura total [m]' (10708.41), and 'Reconido máximo por habitante [m]' (60). It also has a 'Datos del resultado' section with 'Calculado a partir del resultado nº:' and a 'Comentario:' field. The right window, titled 'Coloca contenedores en baterías', has a 'Datos de los contenedores' section with 'Volumen de un contenedor [m3]' (1.1), 'Plazo de recogida [días]' (1), 'Densidad del residuo [kg/m3]' (104.84), 'Factor máximo de llenado [%]' (75), and 'Masa diaria por habitante [kg]' (1.12). The 'Datos del algoritmo' section includes 'Número estimado de contenedores necesarios' (265), 'Número de contenedores a repartir' (265), 'Grado de participación ciudadana [%]' (100), 'Intervalo histograma [metros]' (5), and a list of algorithms: Adams, Dean, Hill, Webster, Jefferson, Hamilton, and 'Distribución espacial (mayor alejamiento)'. A red circle highlights the 'Añadir reparto contenedores' button in the 'Coloca contenedores en baterías' window.

Figura 8. Determinación de las necesidades de contenedores y métodos de reparto dado un número fijo de éstos.

## Captura y evaluación de una distribución de contenedores consolidada

Tras seleccionar una zona geográfica, se fija, el volumen y factor máximo de llenado de un contenedor, el plazo de recogida y, para el residuo, su tipo, densidad y masa media generada por ciudadano y día (Figura 9).

Si los contenedores seleccionados no son de rechazo (por ejemplo, materia orgánica), se considera entonces que los contenedores de rechazo actúan como potenciales puntos de fuga o de pérdida en la recogida selectiva, si éstos se encuentran en la trayectoria de longitud mínima que va desde la casa del ciudadano hasta el contenedor de selectiva más próximo ésta. Es decir, el ciudadano verterá en un contenedor de rechazo la fracción de residuo, aunque no sea el lugar apropiado, salvo que el desplazamiento adicional que deba hacer para verter la fracción de residuo en un lugar apropiado no sea superior a un valor establecido por el

<sup>17</sup> La opción está pensada para repartir contenedores de fracciones: papel y cartón, vidrio, envases ligeros y materia orgánica, cuando no se disponga de suficientes unidades para atender a la población o sea innecesario recoger toda la masa de residuo.

<sup>18</sup> Para el rechazo se considera que el grado de participación ciudadana es del 100%; sin embargo, para las fracciones selectivas y según las zonas de un municipio este valor puede reducirse considerablemente, ya que depende de varios factores: concienciación social sobre el medio ambiente, posibilidades de separar el residuo en casa, etc.

<sup>19</sup> Se han incorporado 7 procedimientos de reparto: 6 métodos clásicos de reparto de escaños en una cámara de representantes y uno de distribución espacial con mayor alejamiento entre contenedores.

usuario. Al parámetro que representa este tipo de valores le hemos denominado “distancia de solapamiento”.

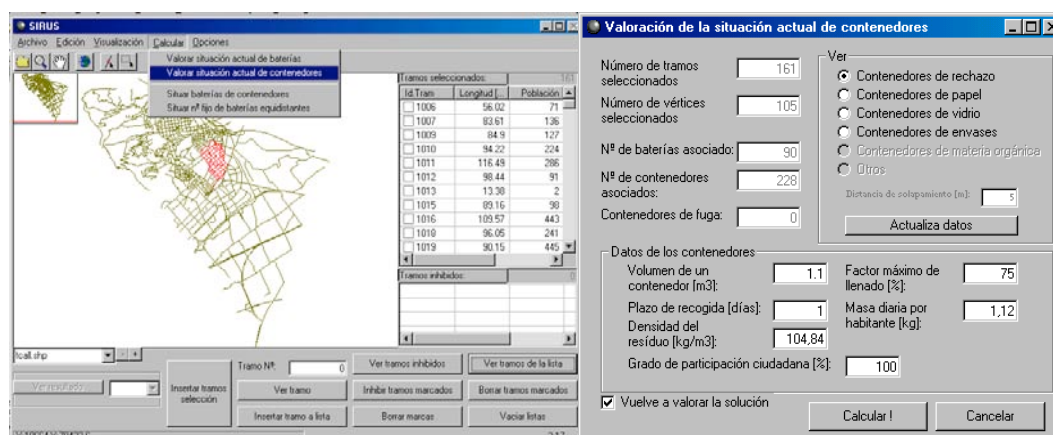


Figura 9. Captura de distribución de contenedores en áreas de aportación

Los resultados relativos al cálculo de necesidades de contenedores o al reparto de un número fijo de éstos (Figura 10) son de dos tipos: agregados por sector y detallados por batería o área de aportación.

Los resultados principales agregados por sector son:

- (1) Población total: suma de las poblaciones censadas en los tramos que constituyen la zona seleccionada.
- (2) Población potencial: se obtiene a partir de la población total y el grado de participación de los ciudadanos que tiene en cuenta la separación de residuo en casa.
- (3) Población activa: se determina a partir de la población potencial teniendo en cuenta las pérdidas de residuo que se producen en el servicio de recogida al adoptar la hipótesis de que un ciudadano verterá la fracción en un contenedor adecuado si no encuentra mucho más cerca un contenedor de rechazo (la cercanía la establece el usuario del sistema).
- (4) Volumen total: volumen de residuo asociado a la población total.
- (5) Volumen de servicio: volumen de residuo asociado a la población activa; este volumen puede estar o no ubicado adecuadamente en los contenedores en función de su número y de la capacidad de los mismos.
- (6) Número medio y máximo de ciudadanos por contenedor en función de las poblaciones total y activa.
- (7) Número medio y máximo de contenedores por área de aportación.
- (8) Factor de llenado medio y máximo de los contenedores.



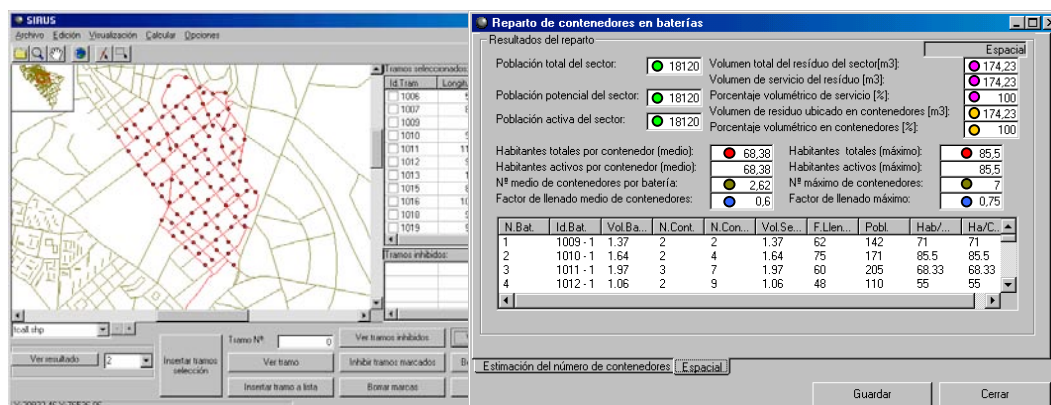


Figura 10. Resultados del cálculo de necesidades de contenedores o del reparto de un número fijo de éstos.

En cuanto a los resultados detallados por área de aportación o batería cabe destacar:

- (1) Volumen total de residuo.
- (2) Volumen de servicio.
- (3) Número de contenedores.
- (4) Factor de llenado de los contenedores.
- (5) Población total.
- (6) Número medio de ciudadanos por contenedor considerando las poblaciones total y activa.

La distinción entre poblaciones responde a un punto de vista industrial del servicio de recogida, pues es conveniente distinguir entre la capacidad que tiene un sector de la población para generar residuo de una cierta fracción (vidrio, papel-cartón, etc.) y la masa que efectivamente puede y/o desea recogerse a través del servicio.

### 1.2.2 Diseño de itinerarios de recogida

Para efectuar el diseño de rutas a través de SIRUS se deben ejecutar las siguientes acciones:

- Selección de zona de circulación.
- Selección de tramos de entrada y salida y su salvaguarda.
- Captura de áreas de aportación y contenedores, y selección de un procedimiento de resolución.

- Visualización de resultados.

### Selección de zona de circulación

En primer lugar se selecciona una zona geográfica constituida por el conjunto de tramos donde está permitida la circulación de los vehículos. Dicha selección debe ser coherente con el conjunto de tramos, que posteriormente se selecciona, continente de las baterías y contenedores que participan en el diseño de los itinerarios de recogida (ver Figura 11).

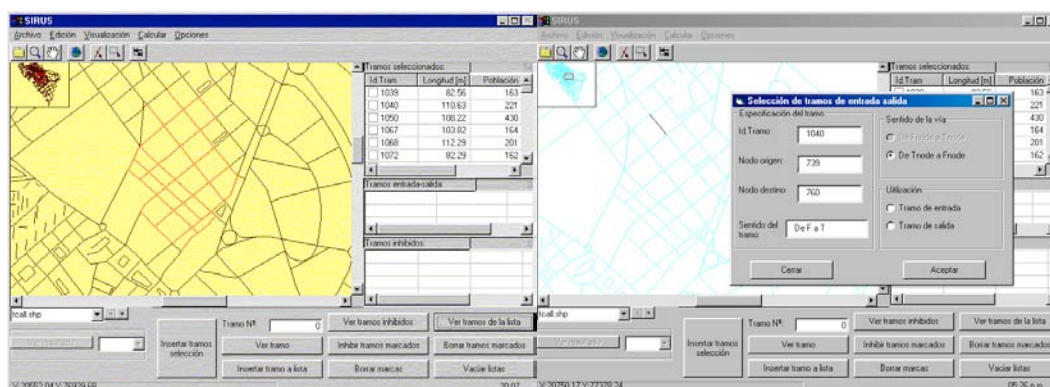


Figura 11. Selección de una zona geográfica de circulación y tramos de entrada y de salida a la zona objeto de estudio.

### Selección de tramos de entrada y salida y su salvaguarda

Posteriormente, es necesario seleccionar un conjunto de tramos de entrada a la zona, así como un conjunto de tramos de salida de la zona. Para cada tramo seleccionado (ver Figura 11), se indica si es de entrada o de salida, y además se fija el sentido de circulación del vehículo; por convenio, se adopta con sentido positivo el que va desde el Fnode del tramo hasta el Tnode del tramo.

Los procedimientos para establecer rutas de recogida exploran la mejor alternativa entrada y salida a la zona de circulación en función de los tramos elegibles al respecto y considerando sus orientaciones; esto significa que cada ruta puede presentar un origen y destino distinto.

Por supuesto, toda la información relativa a la zona de circulación: tramos y orígenes y destinos se guarda en ficheros para posteriores sesiones de trabajo (ver Figura 12).

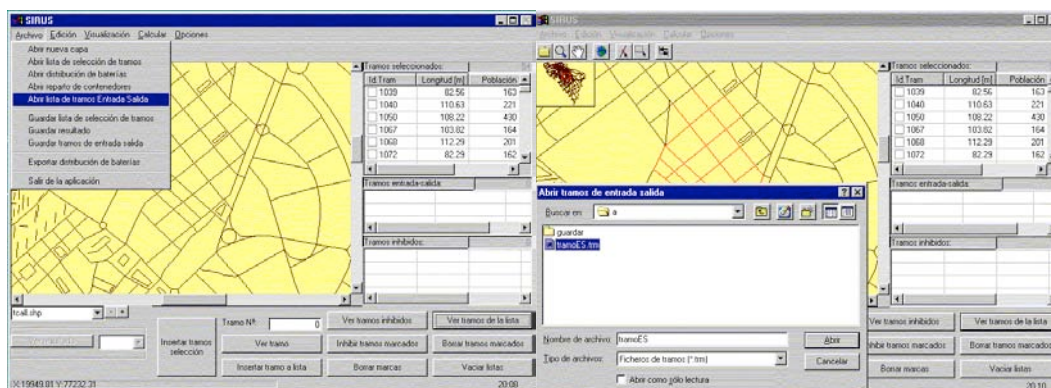


Figura 12. Salvaguarda y recuperación de la información relativa a la zona de circulación para el posterior diseño de itinerarios de recogida.

### Captura de información y selección de un procedimiento de resolución

El paso siguiente es la captura de la información correspondiente a baterías y contenedores: la zona de recogida. Esta zona de recogida debe estar contenida en la zona de circulación; posteriormente, SIRUS comprueba la coherencia de estos datos determinando al menos un camino, si éste existe, entre un tramo de entrada y otro de salida, entre los tramos candidatos, que pase por cada batería de contenedores.

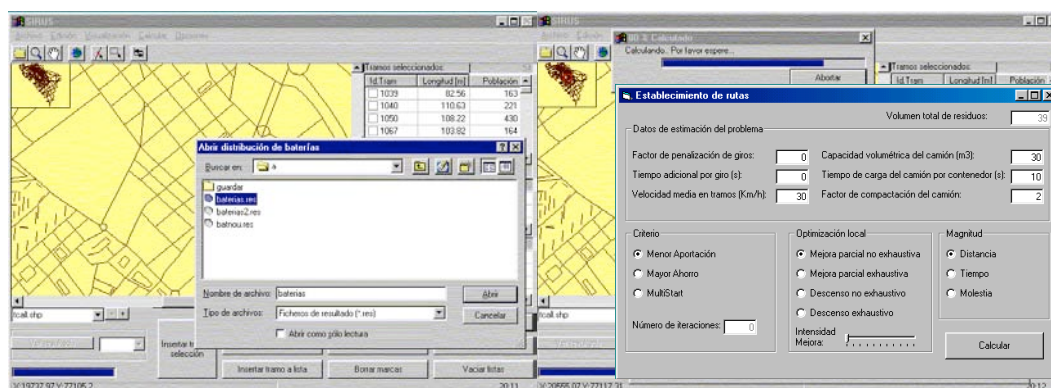


Figura 13. Captura de información de la zona de recogida y solicitud de parámetros y procedimiento de resolución.

Tras esta serie de comprobaciones para garantizar la coherencia de la red base para la rutificación, SIRUS solicita los valores (ver Figura 13) de los parámetros siguientes:

- (1) Factor de penalización de los giros, cuyo objeto es permitir la deformación de la red con el propósito de garantizar rutas lo más rectilíneas posible.
- (2) Tiempo adicional por giro.
- (3) Velocidad media del medio de transporte a través de los tramos.

- (4) Capacidad volumétrica del medio de transporte.
- (5) Coeficiente de compactación del residuo según el tipo de vehículo.
- (6) Tiempo de carga por contenedor.

Después de fijar los valores de los parámetros solicitados se selecciona un método de resolución (Figura 13) entre los 36 algoritmos incorporados<sup>20</sup>.

### Visualización de resultados

Finalmente, se muestran los principales resultados (Figura 14) generales:

- (1) Longitud total.
- (2) Tiempo de operaciones.
- (3) Nivel de molestia<sup>21</sup> ciudadana.
- (4) Volumen total.
- (5) Coeficientes de sinuosidad<sup>22</sup> de los recorridos.

También se muestran en detalle las trayectorias a través de los tramos de cada ruta, la localización definitiva de cada batería de contenedores y el volumen de servicio recogido en cada parada del vehículo.

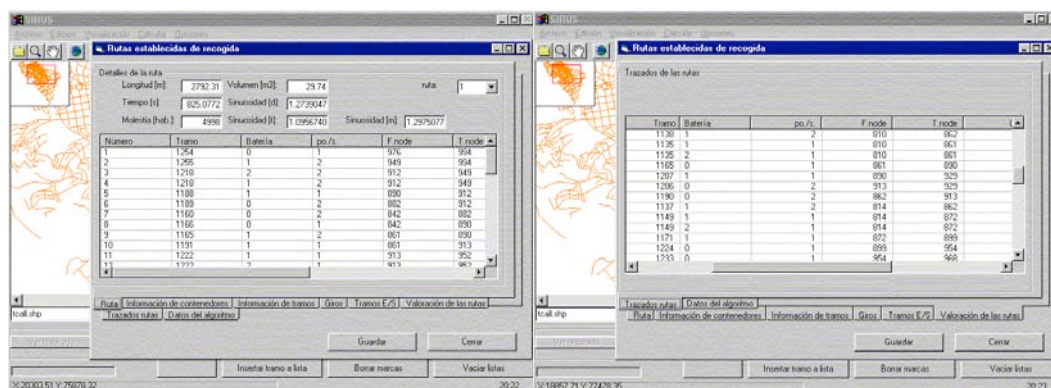


Figura 14. Visualización de resultados relativos al diseño de itinerarios de recogida.

<sup>20</sup> La selección de un algoritmo se realiza fijando una opción en cada uno de los tres módulos de clasificación: (1) procedimiento greedy general de solución, (2) tipo de optimización local y (3) tipo de distancia o indicador del objetivo.

<sup>21</sup> La molestia se mide a partir del número de habitantes localizados en los tramos a través de los cuales concurren las rutas de recogida.

<sup>22</sup> Se define SINUOSIDAD de una magnitud como la razón entre el valor real de la misma y su valor mínimo teórico.

## 2 Tecnología aplicada en el Proyecto

SIRUS ha sido construido para integrarse en el sistema de información geográfica (ARCInfo) disponible actualmente en el Ajuntament de Sant Boi de Llobregat. ARCInfo es un sistema de información, desarrollado por la empresa ESRI, que permite manipular datos geográficos CAD y enlazarlos con bases de datos de sistemas de gestión del propio municipio tales como el padrón de habitantes, impuesto de actividades económicas, datos relativos a tráfico y consumos eléctricos, entre otros. Dadas sus cualidades como herramienta integradora de información, ARCInfo está ampliamente extendido en los sistemas de gestión municipales.

Aquí, distinguiremos dos vertientes asociadas a las tecnologías aplicadas: la informática y la algorítmica. También dedicaremos, haciendo referencia al estado de la técnica, un apartado sobre el software comercial más significativo relacionado con el Proyecto.

### 2.1 Tecnología aplicada. Vertiente informática

Atendiendo a la vertiente informática, las aplicaciones requeridas y utilizadas son:

- ARCInfo: pieza básica del sistema, que permite introducir datos y gestionar los tipos de datos con los que se trabajará. Permite la conversión con sistemas de CAD estándar como Autocad® y Microstation®.
- ARCView: herramienta que permite gestionar los datos introducidos con el anterior de una forma intuitiva. Permite trabajar con bases de datos enlazadas y realizar cálculos estadísticos.
- MapObjects: librería de programación que permite trabajar con datos que posteriormente se pueden tratar con ARCView y enlazar con lenguajes de programación visual como Visual Basic, Visual C, Delphi, etc.

Con el apoyo en las herramientas anteriormente descritas, SIRUS es un producto construido mediante librerías MapObjects y el lenguaje de programación Visual Basic.

SIRUS posee interfaces intuitivas de aspecto parecido (Figura 15) a las del sistema ARCView que permite capturar un conjunto de tramos de calle y sus respectivos datos reales del padrón de habitantes. Esta información sirve de base para la realización de los cálculos y aplicación de algoritmos de optimización. Tras los cálculos, el usuario puede visualizar resultados tales como la localización de áreas de aportación en los tramos, hacer modificaciones y exportar nuevas soluciones al formato de datos ARCView para actualizar la base consolidada.



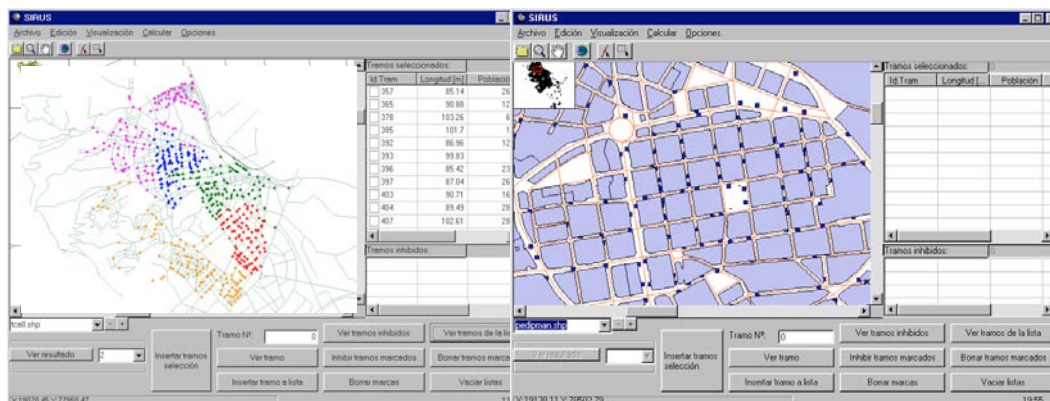


Figura 15. Aspecto de las interfases de SIRUS

El tratamiento interno de todos estos datos se realiza mediante archivos temporales de forma que el usuario tiene un histórico de resultados que puede recuperar para comparar situaciones. Asimismo puede añadir comentarios a los resultados para tener referencias de los cálculos efectuados.

Una de las características de SIRUS es su alto grado de compatibilidad, ya que su ejecución requiere plataformas Intel x86 o compatibles y sistemas operativos Microsoft Windows 95/98/2000 o NT.

## 2.2 Tecnología aplicada. Vertiente algorítmica

En cuanto a la vertiente algorítmica, los procedimientos de resolución empleados se clasifican aquí en función del problema abordado: (a) Algoritmos para la ubicación de áreas de aportación, (b) Algoritmos para el reparto de contenedores y (c) Algoritmos para el diseño de itinerarios.

Para la ubicación de áreas de aportación de residuo o puntos de recogida, de forma que se garantice que los ciudadanos no recorran una distancia superior a una prefijada hasta la batería más cercana, se han programado 100 procedimientos. Los cien algoritmos para ubicar puntos de recogida sobre una red se pueden incluir en la categoría de heurísticos con una primera fase de algoritmo greedy determinista o generación aleatoria, más una segunda que corresponde a una optimización local.

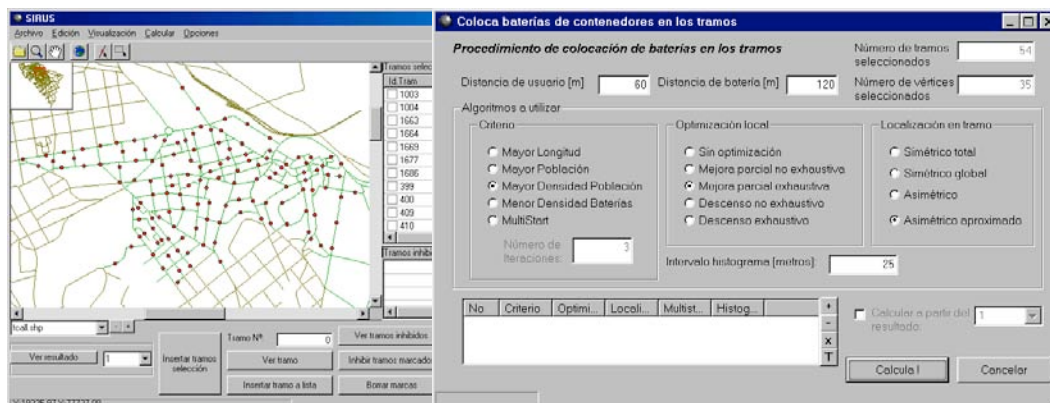


Figura 16. Procedimientos para la ubicación de áreas de aportación garantizando al ciudadano una distancia máxima de desplazamiento.

Los procedimientos de ubicación de áreas de aportación (Figura 16) resultan al combinar:

- Cinco criterios de prioridad en la elección de tramos para satisfacer su cobertura, de manera que un tramo se cubre antes que otro, si el valor del índice del primero es mejor que el del segundo. La aplicación de cada criterio ofrece soluciones distintas. Los criterios para ordenar los tramos son: mayor longitud, mayor población, mayor densidad de población, menor densidad de áreas de aportación y ordenación al azar (MultiStart); esta última opción permite generar tantas soluciones, en función del tiempo disponible, como indique el usuario y el sistema retiene la mejor.
- Cuatro formas de alcanzar óptimos locales a partir de una solución inicial con el empleo de algoritmos de descenso exhaustivo y no exhaustivo y con tamaño de vecindario lineal y cuadrático. También se ha tenido en cuenta como posible resultado la solución inicial (sin optimización).
- Cuatro formas distintas de ubicar baterías en los tramos: forzando la simetría en cada tramo o en la parte de la solución construida, y sin respetar la simetría en la colocación de baterías con garantía de cobertura total (caso Asimétrico) en función de la máxima distancia que puede recorrer un ciudadano, o ubicar menos baterías sacrificando parte de cobertura.

Para la ubicación de un número fijo de baterías sobre la red se ha programado un procedimiento heurístico basado en una analogía física, donde las baterías se asimilan a partículas bajo la influencia de un campo de fuerzas central repulsivo. La función objetivo propuesta es minimizar la energía interna del sistema.



Figura 17. Parámetros para localizar un número fijo de áreas de aportación.

Los parámetros (Figura 17) para el modelo correspondiente son:

- (1) Número fijo de baterías a ubicar.
- (2) Índice de repulsión: es directamente proporcional al exponente de la distancia entre dos partículas cualesquiera en un campo central repulsivo.
- (3) Calibre: se emplea para generar una malla de emplazamientos posibles equidistantes: amplificación de la malla. Estos emplazamientos son los únicos puntos de la red que pueden albergar un área de aportación. La densidad de la malla aumenta con el valor del calibre.
- (4) Distancia mínima entre áreas de aportación: genera una restricción para evitar la concentración de baterías en algunas zonas de la red.

Para el reparto de un número fijo de contenedores en las áreas de aportación se han programado seis procedimientos clásicos de reparto de escaños en una cámara de representantes [04,05,06] y una analogía física similar a la empleada para ubicar un número fijo de baterías.

Ciertamente, el problema de reparto proporcional ha sido ampliamente estudiado, no obstante es en el terreno político hacia donde principalmente se ha enfocado este estudio. Entre los infinitos métodos de divisor existentes hay cinco que se consideran tradicionalmente históricos: Adams, Dean, Hill, Webster y Jefferson, este último conocido también por método de d'Hondt. El sexto método de reparto proporcional seleccionado es el Hamilton.

Cada método de reparto tiene sus ventajas e inconvenientes. Por ejemplo, el de d'Hondt beneficia a las mayorías, por tanto su aplicación servirá para concentrar más contenedores en



aquellas baterías que tengan más población asignada (válido desde el punto de vista industrial). En el otro extremo, el de Adams beneficia a las minorías, por lo que se puede garantizar un servicio homogéneo a todos los ciudadanos en cuanto a los recorridos que deben hacer hasta el área de aportación más cercana.

Para el diseño de itinerarios de recogida, de forma que se respeten las condiciones impuestas por la limitación de la capacidad volumétrica del medio de transporte y por la conveniencia de obtener rutas rectilíneas penalizando los giros de forma similar a la propuesta por Assad y Golden [07], se han programado 36 procedimientos. Los algoritmos resultantes para el diseño de itinerarios se pueden incluir en la categoría de heurísticos con una primera fase de algoritmo greedy determinista o generación aleatoria, más una segunda que corresponde a una optimización local. Todos los métodos de resolución se apoyan en una transformación del problema original de rutas a través de arcos en su equivalente de rutas pasando por vértices, como en Pearn, Assad y Golden [08], resultando un modelo final que se asemeja al propuesto por Laporte, Mercure y Nobert [09]. Los métodos de resolución utilizados son versiones modificadas del algoritmo de ahorros de Clarke y Wright [10], así como una heurística incremental de, por ejemplo, Golden y Assad [11], y con procedimientos de mejora local opcionales como los empleados por Laporte [12].

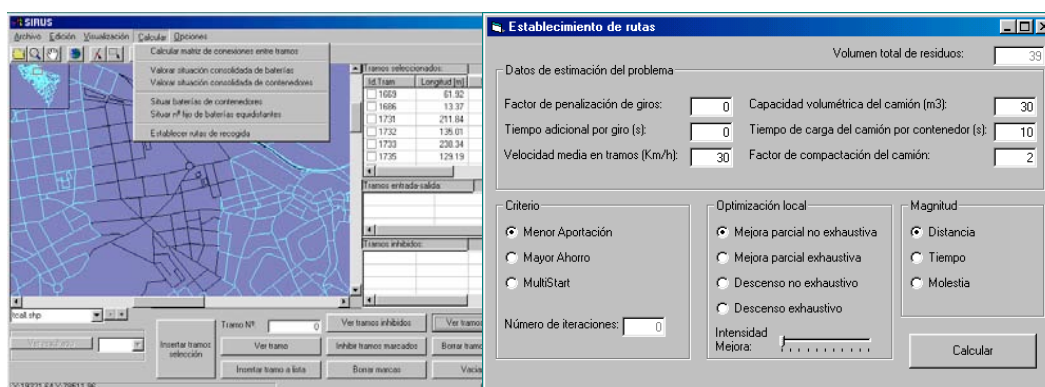


Figura 18. Procedimientos para el diseño de rutas de recogida.

Los procedimientos de resolución empleados en el diseño de rutas (Figura 18) resultan de combinar:

- Tres criterios para dirigir la exploración de soluciones en el procedimiento greedy: la aportación mínima, el ahorro máximo o la generación al azar (MultiStart). La aplicación de cada criterio ofrece soluciones distintas.
- Cuatro formas de alcanzar óptimos locales a partir de una solución inicial con el empleo de algoritmos de descenso exhaustivo y no exhaustivo y con tamaño de vecindario desde lineal hasta cuadrático en función de la intensidad de la mejora.

También se ha tenido en cuenta como posible resultado la solución inicial (sin optimización local).

- Tres magnitudes asociadas al conjunto de recorridos a minimizar: distancia, tiempo y molestia.

## 2.3 Estado de la técnica. Software comercial

Para la resolución de problemas de localización, se halla el soft denominado **Geowhiz**, distribuido por Appian Logistics Software. **Geowhiz** es un programa que permite la visualización y modificación interactiva de localizaciones y la extracción de datos asociados a las localizaciones; no obstante, no es un programa diseñado para la localización óptima, sino para evaluar y obtener información sobre sistemas en los que las instalaciones ya han sido localizadas. También, en una línea similar, hallamos un paquete comercial constituido por dos programas, **TransCad** y **Mapitude**, cuyas prestaciones sobre localización son semejantes a las del paquete anterior e incluye la posibilidad de localizar nuevos centros a escala de ciudades.

Ninguno de los dos paquetes anteriores permite la localización de instalaciones en redes representativas de ciudades, por lo que sus prestaciones no se adaptan a los modelos de localización de áreas de aportación contemplados por SIRUS.

En cuanto a la resolución de problemas de itinerarios, la lista de paquetes comerciales es más abundante. Aquí, hemos seleccionado un conjunto de ellos en base a la posible adaptación al tipo de problemas de rutificación que hemos tratado y por disponer de sus precios:

- Paquete: **ArcLogistics Route 3**  
Compañía: ESRI  
Precio de una licencia: 12.000 \$  
Coste de instalación: 1.200 \$  
Capacidad GIS: SÍ (DynaMap 2000)
- Paquete: **Direct Route**  
Compañía: Appian Logistics Software, Inc.  
Precio de una licencia: 14.375 \$  
Coste de instalación: 2.400 \$  
Capacidad GIS: SÍ (GDT)
- Paquete: **Protour**  
Compañía: Prologos Planung und Beratung  
Precio de una licencia: 18.000 \$  
Coste de instalación: 1.000 \$  
Capacidad GIS: SÍ (Navtech Europe)

- Paquete: **RoadNet 5000**  
Compañía: UPS Logistics Group  
Precio de una licencia: 60.500 \$  
Coste de instalación: 8.550 \$  
Capacidad GIS: SÍ (GDT)
- Paquete: **RoutePro**  
Compañía: CAPS Logistics  
Precio de una licencia: 30.000 \$  
Coste de instalación: 30.000 \$  
Capacidad GIS: SÍ (A elegir)
- Paquete: **Routronics 2000**  
Compañía: Carrier Logistics, Inc.  
Precio de una licencia: 30.000 \$  
Coste de instalación: 8.000 \$  
Capacidad GIS: SÍ (Mapinfo)
- Paquete: **TruckSTOPS Routing & Scheduling for Windows**  
Compañía: Micro Analytics, Inc.  
Precio de una licencia: 9.500 \$  
Coste de instalación: No disponible  
Capacidad GIS: SÍ (PC-Miler)

Todos estos paquetes son de uso general y es necesaria su personalización a las necesidades específicas del cliente; ninguno de ellos ha sido concebido para tratar específicamente problemas de itinerarios en el marco de la recogida urbana selectiva.

El propósito general de dichos paquetes explica que sus precios estén compuestos de dos partes: el coste de la licencia y el coste estimado por la empresa para instalar el producto y personalizarlo a las necesidades específicas del cliente.

Todos ellos tienen capacidades GIS, aunque, como puede verse, el tipo de mapa que pueden utilizar es diferente. Todos ellos hacen uso de la interfaz GIS, tanto para obtener los datos de los problemas como para mostrar los resultados. En general, todos los productos ofrecen características semejantes, incluyendo, en algunos casos tecnologías móviles y rutificación en tiempo real; sus precios (licencia y personalización) no incluyen los costes relacionados con la creación de la información GIS precisada por los paquetes.

### 3 Posibilidades de explotación comercial del sistema

SIRUS es un software<sup>23</sup> más, no es posible patentar las ideas que contiene, pero sí puede comercializarse como un programa.

De cara a la comercialización del software SIRUS y los posibles servicios que se pueden ofrecer con su uso y a través de la UPC, es importante analizar los siguientes aspectos:

- Objetivo
- Características tecnológicas
- Necesidades que cubre la aplicación
- Utilidad en las fases del proceso de gestión
- Potenciales organizaciones usuarias de la aplicación
- Áreas de aplicación y mercado potencial
- Tipología de conocimientos que incorpora
- Potenciales agentes para el mantenimiento, desarrollo, distribución y soporte del producto
- Propuesta de desarrollo

A continuación, consideramos apropiado describir, aunque sea brevemente, cada uno de los puntos anteriores.

#### *Objetivo*

Participar en la mejora de la calidad del servicio de recogida selectiva de residuos ofrecida al ciudadano y en el cumplimiento del marco legal.

#### *Características tecnológicas*

SIRUS es una aplicación de gestión que se apoya sobre un Sistema de Información Geográfico.

---

<sup>23</sup> Según el Artículo 10 (Capítulo II) del Real decreto legislativo 1/1996 (BOE núm 97 del 22 de Abril de 1996), todo programa de ordenador se encuadra dentro de la ley de la propiedad intelectual, por el cual corresponden a su autor todos los derechos de explotación y divulgación de partes o la totalidad del mismo. Dentro de los derechos de explotación se incluyen la distribución, reproducción, transformación y remuneración por copia del producto final.

### *Necesidades que cubre la aplicación*

Básicamente son dos: (1) Localización de áreas de aportación y (2) Diseño de itinerarios de recogida.

### *Utilidad en las fases del proceso de gestión*

La aplicación SIRUS puede aportar valor a las tareas a llevar a cabo en las cuatro fases del círculo de calidad de Demming (método comúnmente usado en la implantación del sistema de aseguramiento de la calidad EFQM), y que corresponden a las de:

- (1) Planificación: Diseño, simulación, elaboración y valoración de alternativas.
- (2) Implantación: Determinación de las ubicaciones y las rutas.
- (3) Verificación: Evaluación del comportamiento real.
- (4) Corrección: Introducción y valoración de modificaciones apropiadas. Revisión de la planificación. Vuelta a la fase (1).

### *Potenciales organizaciones usuarias de la aplicación*

- (1) Las administraciones públicas, como herramienta de diseño y gestión de sus competencias.
- (2) Las empresas adjudicatarias del servicio, como herramienta de optimización de los recursos.
- (3) Las empresas consultoras especializadas, como herramienta para la elaboración de proyectos de gestión.
- (4) Las empresas proveedoras de sistemas y equipos, como herramienta de soporte al diseño de los mismos y de prestigio delante de clientes y competidores.

### *Áreas de aplicación y mercado potencial:*

Cualquier ciudad mediana o grande, de cualquier lugar, que disponga de un servicio de recogida suficientemente organizado. El producto permite sectorizar una ciudad en áreas de análisis más pequeñas.

Los ayuntamientos de ciudades medianas y grandes que dispongan de Sistema de Información Geográfico Municipal son potencialmente los clientes más interesantes (por ejemplo: Sabadell, Terrassa, Mataró, Viladecans, Barcelona, Madrid, Alcobendas, etc.).

### *Tipología de conocimientos que incorpora*

- (1) Técnicas y métodos para la elaboración de propuestas de distribución de áreas de aportación y de itinerarios de recogida.
- (2) Diseño y desarrollo de aplicaciones informáticas en entornos de sistemas GIS.
- (3) Gestión de la recogida selectiva de residuos sólidos urbanos.
- (4) Diseño de sistemas y equipos de recogida.

### *Potenciales agentes para el mantenimiento, desarrollo, distribución y soporte del producto*

#### *Como laboratorio de investigación y desarrollo:*

Laboratori d'Organització Industrial (LOI), Departament d'Organització d'Empreses (DOE) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

#### *Como laboratorio de pruebas y desarrollo práctico:*

Àrea de Serveis de Ciutat de l'Ajuntament de Sant Boi de Llobregat y Divisió de Neteja de CORESSA (empresa municipal de servicios).

#### *Como posibles colaboradores en la distribución, implantación, mantenimiento y soporte del producto:*

- Empresas de software de gestión municipal con oferta de aplicaciones desarrolladas o integradas sobre tecnologías GIS (Audifilm, IECISA, TAO, etc.).
- Empresas de software especializadas en aplicaciones GIS (ESRI España, Geomedia, Naturgest, etc.).
- Empresas concesionarias de servicios y empresas proveedoras de sistemas y equipos que dispongan de departamentos de informática i/o de I+D suficientemente cualificados (Ros Roca, Dragados y Construcciones, etc.).
- Consultoras especializadas que dispongan de recursos humanos suficientemente cualificados.

### *Propuesta de desarrollo*

Marco de colaboración formalizada entre los agentes que aseguren la mayor aportación de valor y la protección del capital intelectual en los procesos de diseño, desarrollo, verificación, distribución y soporte del producto.

### *Contactos recientes y colaboraciones previstas de inmediato*

En los momentos de escribir este resumen, y por iniciativa de los clientes inmediatos que han mostrado su interés por SIRUS, se están manteniendo contactos para formalizar nuevas colaboraciones con los representantes del Ajuntament de Sant Boi y la empresa CORESSA, por una parte, y con la empresa Minuartia Estudis Ambientals SL que debe realizar el proyecto de definición del sistema de recogida de residuos urbanos en el municipio de Sant Celoni.

## 4 Innovaciones y ventajas del Proyecto

Las ventajas que ofrece SIRUS, además de su alto grado de compatibilidad en plataforma y sistemas operativos, están en su capacidad de diseño y evaluación de sistemas de recogida urbana selectiva de manera ágil. La gestión del servicio de recogida se hace más compleja con la aplicación del PNRU por las repercusiones que comporta la separación de fracciones.

Para concretar, destacaremos aquí cuatro aspectos que consideramos relevantes, por su innovación, en el ámbito económico - social:

- Planificación y programación del servicio de recogida de residuos
- Servicio de información al ciudadano
- Estandarización de sistemas
- Reducción de costes y mejora del servicio

### *Planificación y programación del servicio de recogida de residuos*

Las aportaciones que ofrece SIRUS en este terreno son claras, entre ellas:

- (1) Es posible planificar a medio y largo plazo de manera ágil el servicio de recogida selectiva en un municipio o zona del mismo. Para ello basta con simular escenarios en el futuro para los que, básicamente, se requiere la evolución de la población y la información referente a planes urbanísticos. Esto significa que es posible diseñar el sistema físico de recogida en una nueva urbanización sin que sea necesario que el ajuste del servicio se realice sólo a partir de un proceso de ensayo y error sobre un sector poblado del territorio.
- (2) También es posible, con el apoyo de un sistema de seguimiento, programar de manera rápida las operaciones necesarias para ajustar el servicio de recogida ante cambios planificados (pe. calle en obras, mejora de la vía pública) e imprevistos (vg. inundaciones).

Obviamente, estas labores, cuya responsabilidad recae sobre empresas proveedoras del servicio a los ayuntamientos, requieren un gran esfuerzo si se carece de herramientas informáticas que apoyen y justifiquen las decisiones relativas a la oferta de un buen servicio.



### *Servicio de información al ciudadano*

Los resultados que se obtiene con la explotación de SIRUS pueden ser también útiles para que los ciudadanos estén informados detalladamente sobre el servicio de recogida.

Una de las propuestas para la extensión del proyecto es ofrecer, con el apoyo de SIRUS, un sistema de información cuyo objeto es dar respuesta a las consultas ciudadanas; por ejemplo:

- Situación del área de aportación más cercana a un número de una determinada calle.
- Situación de los contenedores de las distintas fracciones respecto a un punto del municipio.
- Distancia mínima que debe recorrer un ciudadano para depositar un tipo de residuo.

Esta información, que ya ofrece el sistema, es fundamental para justificar las decisiones tomadas para la oferta del servicio en caso de que se produzcan quejas sobre el mismo.

El servicio de información se puede ofrecer directamente al ciudadano a través de diversas vías, como la telefónica o la página web del municipio; o de forma colectiva a través de otros medios de comunicación.

### *Estandarización de sistemas*

El alto grado de compatibilidad de SIRUS y la amplia difusión de ARCInfo en los sistemas de gestión municipales hacen pensar en su aceptación en otros municipios como una herramienta estándar. Este hecho supone una mejor comunicación entre ayuntamientos y empresas con intercambio de experiencias relativas al diseño e implantación de sistemas físicos de recogida; lo cual repercute, nuevamente, en el mejor aprovechamiento de recursos.

### *Reducción de costes y mejora del servicio*

Los resultados que ofrece SIRUS permiten desvelar deficiencias en la calidad del servicio tales como recorridos ciudadanos muy largos y áreas de aportación sobrecargadas; también desvelan derroches innecesarios como número de contenedores en exceso o áreas de aportación muy próximas. Este tipo de resultados, que se obtienen interactivamente y en breve tiempo con cada modificación sobre el diseño del sistema físico, servirá para tomar las medidas correctivas oportunas con el objetivo de mejorar la calidad y aprovechar mejor los recursos.

## 5 Duración y presupuesto del Proyecto

La realización del proyecto se dividió inicialmente en cinco fases, una de contacto y cuatro de desarrollo:

- Fase 0: Informativa.
- Fase 1: Fase Delimitativa.
- Fase 2: Fase Instrumental [prototipo].
- Fase 3: Fase Documental.
- Fase 4: Operativa.

### 5.1 Actividades

La división por fases, partes y actividades se detalla a continuación:

#### **Fase 0: Informativa**

##### **010 ELABORACIÓN DE INFORME MEMORIA DE GESTIÓN-98 CORESSA**

10. Datos sobre servicios
20. Datos sobre personal

##### **020 COLECTA DE DATOS SOBRE RESIDUOS**

10. Tipos de residuos, clasificación, composición, porcentajes de presencia, pesos específicos, volumen por habitante, tipo y año.
20. Evolución en la generación de residuos por tipo (previsiones).

##### **030 COLECTA DE DATOS SOBRE ELEMENTOS DEL SISTEMA DE RECOGIDA**

10. Camiones, volúmenes, coeficientes de compactación, peso específico de residuos compactados.
20. Contenedores, capacidades, coeficientes de compactación, peso específico de residuos compactados, superficie ocupada, versatilidad en tipo de recogida (lateral, frontal o trasera).
30. Sistemas de recogida.

##### **040 PREPARACIÓN DE DATOS GEOGRÁFICOS AJUNTAMENT**

10. División del territorio en tramos.
20. Población por tramos.
30. Tiempos y sentido de recorrido en tramos.
40. Ubicaciones de emplazamientos (coordenadas, tipo y número).
50. Actividades comerciales e industriales en tramos.

#### 050 NORMATIVA VIGENTE

- 10. Solicitud.
- 20. Estudio.

#### 060 RECOGIDA DE INFORMACIÓN SOBRE SISTEMAS EN OTROS MUNICIPIOS

- 10. Poblaciones catalanas.
- 20. Poblaciones estatales.
- 30. Poblaciones europeas.
- 40. Poblaciones norteamericanas.

#### 070 TRASPASO HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS AJUNTAMENT - UPC

- 10. Bases de datos numéricas.
- 20. Bases gráficas.

#### 080 INSTALACIÓN EN UPC DE SOFT/BASES CONVIVIALES AJUNTAMENT

- 10. Sistema de información gráfica.
- 20. Bases de Datos.

#### 090 FAMILIARIZACIÓN EN UPC CON SOFT AJUNTAMENT

- 10. Bases de datos.
- 20. Programas.

### Fase 1: Delimitativa

#### 110 DETERMINACIÓN DE SISTEMAS DE RECOGIDA A INCORPORAR EN EL ESTUDIO

- 10. Alternativas a priori.
- 20. Selección.
- 30. Definición del grado de tratamiento de alternativas seleccionadas.

#### 120 DEFINICIÓN DE DATOS

- 10. Entradas a las aplicaciones 0, 1 y 2.
- 20. Salidas de las aplicaciones 0, 1 y 2.

#### 130 DEFINICIÓN DE MODALIDADES DE PRESENTACIÓN DE DATOS

- 10. Presentación de entradas.
- 20. Presentación de salidas.

#### 140 DEFINICIÓN DE ALGORITMOS

- 10. Aplicación 0: Localización de baterías o puntos de recogida y vertido.
- 20. Aplicación 1: Distribución de contenedores.
- 30. Aplicación 2: Diseño de itinerarios.

## **Fase 2: Instrumental: Desarrollo del Prototipo**

### **210 DETECCIÓN GAPS Y DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS INTERFACES**

10. Gap entradas y salidas aplicaciones 0, 1 y 2.
20. Gap presentaciones entradas y salidas aplicaciones 0, 1 y 2.

### **220 ALGORITMOS APLICACIÓN 0: LOCALIZACIÓN DE BATERÍAS**

10. Diseño de algoritmos AA0.
20. Programación AA0.
30. Pruebas aisladas AA0.
40. Interfaces prototipo para AA0 con sistema Ajuntament.
50. Pruebas con interfaces prototipo y bases de datos Ajuntament.
60. Implantación.

### **230 ALGORITMOS APLICACIÓN 1: DISTRIBUCIÓN DE CONTENEDORES**

10. Diseño de algoritmos AA1.
20. Programación AA1.
30. Pruebas aisladas AA1.
40. Interfaces prototipo para AA1 con sistema Ajuntament.
50. Pruebas con interfaces prototipo y bases de datos Ajuntament.
60. Implantación.

### **240 ALGORITMOS APLICACIÓN 2: DISEÑO DE ITINERARIOS DE RECOGIDA URBANA**

10. Diseño de algoritmos AA2.
20. Programación AA2.
30. Pruebas aisladas AA2.
40. Interfaces prototipo para AA2 con sistema Ajuntament.
50. Pruebas con interfaces prototipo y bases de datos Ajuntament.
60. Implantación.

## **Fase 3: Documental: Redacción informe**

### **310 PARTE I: ANÁLISIS**

10. Introducción a los sistemas de recogida de residuos.
20. Análisis del sistema actual de recogida en el municipio de Sant Boi.
30. Marco general de la recogida de residuos en el municipio de Sant Boi.

### **320 PARTE II: BÚSQUEDA DE SOLUCIONES**

10. Definición de necesidades.
20. Diseño y desarrollo de propuestas.

### **330 PARTE III: SELECCIÓN**

10. Evaluación de alternativas.

- 20. Selección de alternativas.
- 30. Proyecto de Implantación.

#### **Fase 4: Operativa: Sistema informático**

##### **410 IMPLANTACIÓN.**

- 10. Interfaces definitivas para AA0, 1 y 2 con sistema Ajuntament.
- 20. Pruebas con interfaces definitivas y bases de datos Ajuntament.
- 30. Instalación.

### **5.2 Duración del proyecto**

Se estimaron las duraciones de las tareas a realizar con recursos humanos ilimitados y unidad de tiempo la jornada de 8h.

Tras esta estimación, se programaron las actividades con fechas mínimas y máximas de inicio y márgenes totales, detectando las actividades críticas. En tales condiciones, la duración mínima del proyecto resultante fue de 89 días laborales (ver tabla 1), claro está, bajo el supuesto que no se produjera ninguna incidencia a lo largo del desarrollo.

Teniendo en cuenta los recursos humanos disponibles para el proyecto y la dedicación parcial para algunos miembros del equipo, resultó una duración de 130 días laborales que sirvieron de base para elaborar el presupuesto.

Las Fases 3 y 4 sirvieron para depurar las bases de datos del Ajuntament (coherencia de enlaces entre tramos, definición de rotondas, señalizaciones, giros, etc.); este hecho prolongo las duraciones de las actividades de evaluación y selección de alternativas, hecho previsible en cualquier puesta en práctica, pero que no afectó al presupuesto acordado.

Es importante destacar en este punto la relación estrecha que pensamos existe entre la explotación de un modelo y la depuración de datos para que alcancen su total coherencia: nuestra experiencia hasta ahora nos ha llevado siempre a las mismas conclusiones.

Por una parte, en ocasiones se dispone de un conjunto de datos cuya utilidad práctica es nula hasta que, claro está, no se presenta un problema que los requiere; cuando, efectivamente, éstos son requeridos y además son imprescindibles para resolver un problema es justamente en esta fase de explotación de modelo cuando son sometidos de manera rigurosa y sistemática a pruebas de coherencia.

Por otra parte, aquí es también donde podemos apreciar la importancia de la integración de la información; a veces, la información es redundante con uno o varios dueños de las bases de

datos, cosa que supone un relativo derroche, pero que no debería ser grave si existiera coherencia informativa propiciada por la coordinación de los distintos agentes; otras veces, la información se tiene y además es coherente, pero está dispersa y sin que todas las partes que constituyen la organización conozcan lo que existe globalmente; esto último puede llevarnos de nuevo a la redundancia.

Núm.	Act.	Dur.	F.Min.	F.Máx.	Margen	Status	Núm.	Act.	Dur.	F.Min.	F.Máx.	Margen	Status
1	01010	5	0	29	29	-	31	13010	5	53	57	4	-
2	01020	5	0	29	29	-	32	13020	5	53	57	4	-
3	01030	5	0	29	29	-	33	14010	5	58	62	4	-
4	02010	19	0	5	5	-	34	14020	5	58	62	4	-
5	02020	10	19	24	5	-	35	21010	10	53	57	4	-
6	03010	29	0	5	5	-	36	21020	10	53	57	4	-
7	03020	29	0	5	5	-	37	22010	3	63	71	8	-
8	03030	29	0	5	5	-	38	22020	2	66	74	8	-
9	04010	1	0	9	9	-	39	22030	1	68	76	8	-
10	04020	1	0	9	9	-	40	22040	2	69	77	8	-
11	04030	1	0	9	9	-	41	22050	2	69	77	8	-
12	04040	1	0	9	9	-	42	22060	1	71	79	8	-
13	04050	1	0	9	9	-	43	23010	5	63	67	4	-
14	05010	19	0	0	0	**CRIT**	44	23020	3	68	72	4	-
15	05020	15	19	19	0	**CRIT**	45	23030	2	71	75	4	-
16	06010	24	0	10	10	-	46	23040	2	73	77	4	-
17	06020	24	0	10	10	-	47	23050	2	73	77	4	-
18	06030	24	0	10	10	-	48	23060	1	75	79	4	-
19	06040	24	0	10	10	-	49	31010	26	48	48	0	**CRIT**
20	07010	9	1	10	9	-	50	31020	26	48	48	0	**CRIT**
21	07020	9	1	10	9	-	51	31030	26	48	48	0	**CRIT**
22	08010	3	10	19	9	-	52	32010	6	74	74	0	**CRIT**
23	08020	2	13	22	9	-	53	32020	6	74	74	0	**CRIT**
24	09010	33	15	24	9	-	54	33010	5	80	80	0	**CRIT**
25	09020	33	15	24	9	-	55	33020	5	80	80	0	**CRIT**
26	11010	4	34	34	0	**CRIT**	56	33030	5	80	80	0	**CRIT**
27	11020	5	38	38	0	**CRIT**	57	41010	2	85	85	0	**CRIT**
28	11030	5	43	43	0	**CRIT**	58	41020	2	87	87	0	**CRIT**
29	12010	3	48	52	4	-	59	41030	1	89	89	0	**CRIT**
30	12020	2	51	55	4	-							

Tabla 1. Calendario inicial de actividades del Proyecto.

### **5.3 Presupuesto**

Evaluada la carga de trabajo, el presupuesto global (bruto) ascendió a **4.880.000** pta.; en detalle:

- Obtención y tratamiento datos. Alternativas y valoración. Documentación.  
Presupuesto: 720.000 pta.
- Dirección y administración desde el IOC  
Presupuesto: 900.000 pta.
- Estudio y diseño de algoritmos de localización de contenedores  
Presupuesto: 360.000 pta.
- Construcción, desarrollo y pruebas del motor de localización de contenedores  
Presupuesto: 850.000 pta.
- Estudio y diseño de algoritmos de diseño de itinerarios urbanos  
Presupuesto: 300.000 pta.
- Construcción, desarrollo y pruebas del motor de diseño de itinerarios urbanos  
Presupuesto: 850.000 pta.
- Diseño de interfases con sistemas de información gráfica  
Presupuesto: 300.000 pta.
- Construcción de interfases con sistemas de información gráfica  
Presupuesto: 600.000 pta.

### **5.4 Financiación**

El Proyecto, tal como fue concebido inicialmente, fue financiado íntegramente por el Ajuntament de Sant Boi de Llobregat a través del establecimiento de un convenio de colaboración Universidad - Empresa (C3445).

## 6 Incidencia del Proyecto en el desarrollo de las actividades de investigación del grupo

En SIRUS se concentran una serie de técnicas de análisis, modelización, resolución e implantación propias de la línea de investigación Organización Industrial<sup>24</sup>. De hecho, el proyecto se enmarca en la categoría de decisiones de gestión relativas al diseño de sistemas productivos y logísticos. Concretamente, se abordan problemas clasificados<sup>25</sup> bajo las denominaciones:

- Localización (Facility Location problem)
- Reparto proporcional (Apportionment problem)
- Diseño de itinerarios (Vehicle routing problem)

SIRUS aporta nuevas variantes de los tres problemas mencionados, pues ha sido necesario considerar, por motivos obvios de aproximación a la realidad, una serie de criterios de optimización y tipología de restricciones distintas, en ambos casos, a los que comúnmente encontramos en la literatura científica. No obstante, como suele ser frecuente, estas referencias han servido de base y de inspiración a la hora de modelar y de diseñar procedimientos de resolución para el proyecto.

Las variantes detectadas abren nuevas vías de trabajo en el campo de aplicaciones y diseño de procedimientos de resolución. En efecto, tanto el problema de localización de baterías o puntos de recogida de residuos como el de diseño de itinerarios son problemas de optimización combinatoria, difíciles de resolver de forma óptima por su complejidad<sup>26</sup> intrínseca. Para la resolución de estos problemas se pueden emplear:

- (a) Procedimientos exactos basados en técnicas de exploración dirigida en árboles y grafos de búsqueda.
- (b) Algoritmos heurísticos greedy deterministas.
- (c) Algoritmos heurísticos greedy aleatorios: GRWASP.
- (d) Meta-Algoritmos de exploración de entornos: Búsqueda Tabú (TS), Recocido simulado (SA), Algoritmos genéticos (GA), de hormigas (ACO), de evolución diferencial (DE), etc.

---

<sup>24</sup> Código 53119901: Línea del Departamento de Organización de Empresas (DOE) de la UPC.

<sup>25</sup> La clasificación corresponde a la disciplina Investigación Operativa, estrechamente ligada a los Métodos cuantitativos de Organización Industrial.

<sup>26</sup> Garey & Johnson (1979); *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. Freeman.



Los procedimientos anteriores son generales y requieren, para diseñar un algoritmo en sentido estricto, la definición de una serie de elementos tales como: cotas, estrategias de exploración, reglas de prioridad, lista y reglas tabú, temperatura, operadores de selección cruce y mutación, y difusión y orientación a través del rastro de la comunidad, entre otros.

En SIRUS se han incorporado procedimientos clasificados en las categorías (b) y (c), sin explotar, por supuesto, todas sus posibilidades.

En el momento de presentar esta memoria, el grupo, bajo la orientación de dos tesis doctorales, en cuya dirección el aspirante es partícipe, también está realizando ensayos con procedimientos de la categoría (a) y (d) con el propósito de resolver problemas de localización de generadores de flujo y de diseño de su red de distribución en zonas urbanas y en dos ámbitos de aplicación: energía eléctrica y recogida subterránea de residuos. Uno de los objetivos de estos trabajos es la unificación de modelos para la distribución de flujos a través de una red.

Obviamente, los problemas de distribución de flujos y de localización de centros de servicio en zonas urbanas no son exclusivos de la recogida de residuos; sirvan como ejemplo: líneas de autobuses, rutas de reparto, distribución de agua y energía, localización de cabinas, cajeros, etc. Este hecho propicia nuevas extensiones del proyecto SIRUS que pueden servir de soporte a actividades municipales y empresariales.

## **7 Participación y grado de colaboración del Ajuntament**

Durante el desarrollo del Proyecto, con reuniones de seguimiento quincenales, se ha establecido una estrecha colaboración entre los miembros participantes de la UPC, Ajuntament de Sant Boi y la empresa municipal CORESSA. Todas las actividades relativas a la definición de objetivos y criterios, suministro de información, adecuación de bases de datos, diseño, desarrollo e implantación de procedimientos de resolución, etc., difícilmente se habrían ejecutado con éxito, dada la singularidad de los problemas planteados, de no haberse constituido un equipo pluridisciplinario en el marco de un convenio de colaboración entre dos organismos: La UPC desempeñando el papel de laboratorio de investigación y desarrollo, y el Ajuntament de Sant Boi de Llobregat que ha facilitado los medios para disponer de un laboratorio de pruebas y desarrollo práctico.

## 8 Algunos resultados de explotación del sistema y una conclusión final

La primera aplicación de este sistema ha sido la evaluación del sistema original de recogida para evaluar sus defectos. En los dos barrios utilizados por la alcaldía para dividir el centro urbano, un porcentaje entre el 10 y el 23% de los habitantes se encontraban a distancias superiores a las nuevas distancias de servicio fijadas por el ayuntamiento. En el resto de vecindarios este porcentaje era mayor, siendo necesario el diseño de un nuevo sistema de recogida completamente nuevo basado en los resultados ofrecidos por la aplicación. Adicionalmente, el programa ha permitido diseñar un sistema de recogida selectiva y ayudado a la generación de rutas de recogida que anteriormente se realizaba el propio conductor.

	Barrio 1	Barrio 2	Barrio 3
Población	18120	14321	19262
Longitud total de las calles con población	10920 m.	16313 m.	11732 m.
Número de áreas de aportación	90/101	99/134	96/110
Distancia media con la población	32.63/24.50	40.91/26.10	39.15/24.32
Distancia máxima con la población	210.86/60.0	261.03/60.00	316.40/60.0
Distancia media entre pares áreas de aportación más próximas	49.19/80.20	66.30/82.18	43.12/85.63

Tabla 2: Resultados comparativos entre el sistema de recogida anterior y el nuevo sistema. Se muestra la población total y la longitud de las calles que componen el barrio. El número de áreas de aportación y las distancias medias y máximas entre los ciudadanos y su área de aportación más cercana, así como la distancia media entre áreas de aportación, son utilizados para comparar ambas propuestas. El primer número de cada casilla representa los valores de la configuración anterior, mientras que el segundo representa los de la nueva configuración.

La Tabla 2 muestra las diferencias principales entre el sistema original y el utilizado actualmente obtenido mediante SIRUS, ya que se disponía de los datos originales para realizar tal comparación. El barrio 1 y 2 son los barrios del casco urbano central, mientras que el barrio 3 corresponde al barrio más poblado de la ciudad. La distancia máxima entre un habitante y su área de aportación más cercana fue fijada como parámetro del problema para conseguir la calidad de servicio fijada por la municipalidad. Los resultados muestran una mejora global de la calidad de servicio con una adición mínima de áreas de aportación. Un dato importante en la comparativa es la distancia media entre áreas de aportación que aumentó, aunque el número de áreas de aportación también lo hizo, lo que nos permite asegurar una distribución mucho más equitativa de las áreas de aportación entre los diferentes ciudadanos.

Como conclusión final, podemos decir que la conjunción de los sistemas de información geográficos, los sistemas de ayuda a la decisión y los métodos cuantitativos de gestión, han permitido la obtención de una aplicación que permite una aproximación metodológica a la resolución de un problema. Una herramienta con estas características facilita la realización de los cálculos necesarios durante la etapa de toma de decisiones en el marco de un plan.

## 9 Referencias generales

- [01] Kariv, O.; Hakimi, S.L. (1979) An algorithmic approach to network location problems. I: The p-centers. *Siam Journal of Applied Mathematics*, 37 (3) 513-538.
- [02] Tamir, A. (1985) A finite algorithm for the continuous p-center location problem on a graph. *Mathematical Programming*, 31, 298-306.
- [03] Tamir, A. (1987) On the solution value of the continuous p-center location problem on a graph. *Mathematics of Operations Research*, 12 (2) 340-349.
- [04] Balinski, M.L.; Young H.P. (1982) *Fair Representation*. Yale University Press, New Haven, CT.
- [05] Balinski, M.L.; Young H.P. (1994) Apportionment. In *Operations Research and the Public Sector, Handbooks in Operations Research and Management Science*, vol. 6. North-Holland, Amsterdam.
- [06] Bautista, J.; Companys, R.; Corominas, A. (2000) Solving the generalized apportionment problem through the optimization of discrepancy functions. Aceptado (marzo 2000) en *European Journal of Operational Research*.
- [07] Assad, A.; Golden B.L. (1995) Arc Routing Methods and Applications. In *Network Routing, Handbooks in Operations Research and Management Science*, vol. 8. North-Holland, Amsterdam.
- [08] Pearn, W-L.; Assad, A.; Golden, B.L. (1987) Transforming arc routing into node routing problems. *Computers and Operations Research*, 14 (4) 285-288.
- [09] Laporte, G.; Mercure, H.; Nobert, Y. (1992) A branch and bound algorithm for a class of asymmetrical vehicle routing problems. *Journal of Operational Research Society*, 43 (5) 469-481.
- [10] Clarke, G., Wright, J.W. (1964) Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 12, 568-581.
- [11] Golden, B.L. (ed.) (1988) *Vehicle Routing: Methods and Studies*. Studies in management science and systems, vol. 16. Elsevier Science Publishers.
- [12] Laporte, G. (1992) The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59 (3) 345-358.

## Anexo I: Referencias sobre el Proyecto (orden cronológico)

Bautista, J.; Palanques, D.; Ortiz, A. (1999) *SIRUS Informe 0. Documento interno de trabajo*. UPC. Barcelona.

- Documentos:
- [1] Memoria, IOC-DT.C/1999-10
  - [2] Anexo I. Programación, IOC-DT.C/1999-11
  - [3] Anexo II. Datos, IOC-DT.C/1999-12
  - [4] Anexo III. Estimaciones, IOC-DT.C/1999-12

Bautista, J.; Palanques, D.; Ortiz, A. (1999) *Evolución de necesidades de contenedores de rechazo en el marco del PMGRM en el municipio de Sant Boi de Llobregat. Documento interno de trabajo*. UPC. Barcelona.

- Documentos:
- [1] Informe, IOC-DT.C/1999-15
  - [2] Memoria y Anexo: IOC-DT.C/1999-16

Bautista, J.; Palanques, D.; Ortiz, A. (1999) *Propuesta de una metodología para determinar la composición del residuo generado por actividades comerciales. Documento interno de trabajo IOC-DT.I/1999-06*. UPC. Barcelona.

Bautista, J. (2000) *SIRUS: Sistema integrado de recogida urbana selectiva. Actas Jornadas Técnicas de la ANEPMA "Cultura de los residuos sólidos en el siglo XXI"*. Lorca 11 y 12 de Mayo de 2000.

Bautista, J. (2000) *SIRUS como sistema de ayuda a la decisión para la organización de contenedores en la vía pública. Documento interno de trabajo LOI-DOE-UPC, DIT-00/17*. Barcelona.

Bautista, J. (2000) *El sistema SIRUS aplicado a la organización de contenedores en la vía pública. 3era Jornada Tècnica sobre la gestió de residus municipals. Plàstic, Vidre i Paper*. OSMA, Barcelona 5 de octubre de 2000. Col·lecció Jornades Tècniques / 3. Tercera jornada técnica sobre la gestió de residus municipals. Plàstic, vidre i paper. ISBN: 84-7653-782-4. Pag: 59-84.

Bautista, J.; Companys, R. (2000) *SIRUS: Un sistema de ayuda a la decisión para la recogida selectiva de residuos urbanos. Congreso sobre Técnicas de Ayuda a la Decisión en la Defensa. Actas Ministerio de Defensa, Secretaría General Técnica, vol I*, pp. 327-347. Madrid 12 a 15 de diciembre de 2000.

Bautista, J. (2001) *Método de valoración del sistema actual de recogida urbana selectiva en Sant Boi de Llobregat*. J. Bautista, Barcelona, ISBN 84-699-3913-0, DL. B: 4.300-2001.

Bautista, J. (2001) *Proyecto integral de gestión de residuos urbanos en el municipio de Sant Boi de Llobregat*. J. Bautista, Barcelona, ISBN 84-699-3911-4, DL. B: 4.301-2001.

Bautista, J. (2001) *Metodología para la elaboración de propuestas de distribución de áreas de aportación para la recogida urbana selectiva en Sant Boi de Llobregat*. J. Bautista, Barcelona, ISBN 84-699-3912-2, DL. B: 4.302-2001.